

# 日本の高山岩壁とそれを取り巻く斜面における地形形成特性-穂高岳涸沢カールでの岩屑生産・移動の様式および規模・頻度の観測と解析-

著者	岩船 昌起
号	42
学位授与番号	1710
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/38664">http://hdl.handle.net/10097/38664</a>

氏名・(本籍)	いわふねまさき 岩 船 昌 起
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	理博第1710号
学位授与年月日	平成11年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)地学専攻
学位論文題目	日本の高山岩壁とそれを取り巻く斜面における地形形成特性 ー穂高岳涸沢カールでの岩屑生産・移動の様式および規模・頻度の観測と 解析ー
論文審査委員	(主査) 教授 田村俊和 教授 日野正輝 助教授 松本秀明, 平野信一, 境田清隆

## 論文目次

- I 緒論
- II 岩屑生産における基本的環境因子としての岩壁温度の日変化および季節変化
- III 小規模・高頻度で生じる岩屑生産の機構
- IV 小規模・高頻度で生じる岩屑移動プロセスの特性
- V 大規模・低頻度で生じる岩屑生産の機構および一次的移動プロセス
- VI 岩屑に覆われた小規模舌状水体の形成ー大規模・低頻度で生じる二次的な岩屑移動プロセスー
- VII ライケノメトリーによる岩屑生産域の推定
- VIII 現在の岩屑移動の定量的考察
- IX 現在の岩屑生産の定量的考察
- X 結論と今後の研究の発展性
- 付録 岩屑の形態と体積などに関する実験

# 論文内容要旨

## I 緒論

日本の高山地域での地形形成に関する研究は、氷河地形研究を除くと、特に風衝側の周氷河性平滑斜面（砂礫斜面）を対象とした気候地形学・第四紀学的な視点からのものが多く、風背側を中心に多くの面積を占める岩壁とそれを取り巻く斜面についてはほとんど注目されなかった。しかし岩壁は、カール内での主要な岩屑生産域であり、堆積物にはほとんど覆われないことから、岩屑生産を岩屑移動と分離して考察できる地形単位である。また、その直下に位置する崖錐は、その岩屑移動を反映した堆積域に相当する。これらの地形・堆積物から岩屑生産・移動量を見積もることは、山岳地域での地形形成の実態を把握する上で非常に重要であるにもかかわらず、多大な労力と時間が費やされることから、野外で直接実測されることはほとんどなかった。そこで本研究では、急速度の物質移動を中心とする地形形成プロセスおよびその発現要因を高精度に調査・観測し、日本の高山地域で急傾斜な岩壁が多い場所での岩屑生産・移動について、総合的・定量的に考察する。調査地とした飛騨山脈の南部に位置する穂高岳（奥穂高岳の標高3,190m）およびその風背側の涸沢カール（直径約2km、カール底の標高約2,300m）は、森林限界（現在標高約2,300m）・樹木限界（同約2,850m）との関係や、構成する主要な（小）地形単位からみて、日本の山岳で高山岩壁が発達する模式地とみなせる。

## II 岩屑生産における基本的環境因子としての岩壁温度の日変化および季節変化

岩壁の表面温度は、標高、斜面の向き、木本植生の有無などによる日変化および季節変化の違いを考慮して、涸沢岳東面の標高約3,080mの裸岩壁と、北尾根6峰西北面の標高約2,700mの植被岩壁とで測定した。その結果、特に木本植生の分布の違いが、岩壁の温度変化に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。裸岩壁では、岩盤表面温度の年平均値が0℃前後で、樹木限界以下の植被岩壁よりも最高／最低温度値がそれぞれ高く／低く記録され、凍結融解サイクルも多いことから、岩屑生産機構として凍結融解作用が大きく関わっていることが推定された。

## III 小規模・高頻度で生じる岩屑生産の機構

岩壁において小規模・高頻度で生じる岩屑生産として落石を取り上げ、厳冬期を除く期間について、単位時間内での落石音の発生頻度（数）と発生域である岩壁表面での温度の時間的变化との対応を考察した。その結果、落石の発生は、A～Eの5つのタイプに分類できた。このうち、凍結融解に関わる次の2つのタイプは、他の3つよりも発生頻度が高い。凍結進行時に凍結破碎作用によって2～6回/30分の頻度で発生するDタイプと融解進行時に4～16回/30分の頻度で発生するEタイプである。Eタイプの発生頻度が高いのは、Dタイプで破碎されても氷の接着剤的作用で岩壁に付着していた岩屑が、氷の融解時に次々に岩壁から遊離するためと考えられる。

## IV 小規模・高頻度で生じる岩屑移動プロセスの特性

一年において最も大量に物質移動が生じる融雪期（4～7月中旬）に注目し、その期間に小規模・高頻度で発生する岩屑移動プロセスの特性を解明した。落石は、岩屑の形態だけではなく、大きさにも規定された運動様式を行う。長径30cm程度以下で等方性の低い岩屑は崖錐斜面頂部付近に、より大きい、あるいは等方性の高い岩屑は崖錐斜面下部に運搬される。Dirty avalancheは、小崩壊による相対的に大量の岩屑が残雪斜面に落下・衝突し、残雪を巻き込むことによって、残雪斜面を高速度で移動し、舌状の堆

積域を崖錐斜面上中部に形成する。この先端には巨大な岩屑等が集中する。湿雪混じり土石流は、崖錐斜面頂部付近を発生源として、粒径が小さく、伸長度の高い岩屑を崖錐斜面中部に運搬する。この発生は、発生源に季節的凍結層が存在し、大量の降雨が集中的にもたらされる融雪期後半に限定される。これらによる岩屑運搬量は、落石が約 $3.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ 、Dirty avalancheが約 $7.0 \times 10^4 \text{ m}^3$ である。また、湿雪混じりでは、少なくとも $10^4 \text{ m}^3$ オーダー以上と考えられる。

## V 大規模・低頻度で生じる岩屑生産の機構および一次的移動プロセス

融雪期後半に観察した岩壁崩壊の実態について報告し、大規模・低頻度で生じる岩屑生産の機構および一次的岩屑移動プロセスの特性について考察した。観察した2つの崩壊は、発生音から推定した全プロセスの継続時間と発生源および堆積域との状況などから、平均速度が約20m/sec. (約70km/h)の高速な移動現象であったと考えられる。また、崩壊の発生源の実態などから、以下のような岩壁の構造に規制された崩壊の発生機構を推定した。すなわち、節理間隔が約10cm程度の弱線部周辺では、凍結融解作用等によって、 $10^0 \text{ m}^3$ 前後の岩屑を運搬する落石・崩壊が1回/ $10^0$ 年より高い発生頻度で繰り返され、差別的に削剥・侵食される。その結果、節理間隔の大きい（多くは約50cm以上の）部分が徐々に不安定になり、 $10^3 \text{ m}^3$ 程度の岩屑を運搬する規模の大きい崩壊が1回/ $10^1$ 年以下の低頻度で発生する。これは、高山岩壁での一般的な岩屑生産様式・地形変化機構とみなすこともできる。

## VI 岩屑に覆われた小規模舌状氷体の形成

カール底で発見した、岩屑に覆われた氷体が、大規模・低頻度で発生する湿雪混じり土石流との関連で形成されたことを明らかにした。氷体を覆う岩屑層は、下部が舌状で、上部が比較的鋭利に閉じる平面形態であり、構成物は、比較的角のとれたこぼし大の岩屑が主体で、黄色いチズゴケ（YSR）が付着したものがなく、砂泥をほとんど含まなかった。これらの特徴がIV章の湿雪混じり土石流のそれとはほぼ一致したこと、近年の写真、降水量の記録などから、 $10^3 \text{ m}^3$ オーダーの岩屑を運搬する湿雪混じり土石流が10~20年に1回の頻度で発生していることを把握した。この大規模な湿雪混じり土石流でもたらされた岩屑層に覆われる残雪は、その部分だけ保温されて融解が遅れ、かつ越年時に新雪の重さによる圧密などを受けることによって、氷体となる。この氷体は、残雪の変動が激しく、かつ大量の岩屑が供給される瀬沢カール特有の多年性氷体とみなすことができる。

## VII ライケノメトリーによる岩屑生産域の推定

岩壁と岩屑移動プロセスによって運搬された岩屑についてライケノメトリーを行い、岩壁での岩屑生産域、そこでの削剥強度等を解明した。瀬沢カールの岩壁での岩屑生産は、基本的に高標高になるほど活発に行われる。特に、一次的な移動プロセスで運搬された岩屑と同じ4~15mm大きさのYSRが生育する、標高約2,900m以上の弱線部および弱線縁辺部の岩壁を、現在の主要な岩屑生産域とみなすことができる。YSRの成長曲線などとの関連から、この岩屑生産域での生産周期は、20~80年と考えられる。また、この岩屑生産周期に基づき、岩壁の節理間隔とそこから生産された岩屑の粒径との関係を考慮すると、弱線周辺の岩壁での削剥速度は、約2~8mm/yearと見積もれる。同様に弱線では、岩屑生産周期が10年よりも短く、削剥強度が16mm/year以上と算定した。

## VIII 現在の岩屑移動の定量的考察

落石・崩壊の岩屑移動様式では、落下した岩屑・岩塊が崖錐斜面（残雪斜面）と衝突する過程が、その後の運動形態に重大な影響を与える。落石によって、岩屑が残雪斜面に衝突し、自由落下的な運動か

ら跳動や転動に運動様式を変換する場合には、岩屑の等方性が低くなるほど失うエネルギーが大きくなり、残雪に埋もれる可能性が高まる。一方、岩屑量が大きくなると、落石から崩壊へと移行し、残雪斜面上ではDirty avalancheの運動形態となる。この場合の岩屑量のしきい値は、約 $10^0 \text{ m}^3$ である。残雪斜面との衝突時に残雪を巻き込むか否かを決定するこの値は、その時の残雪や崩落岩塊の状態等で漸移的に変動する。

発生源上端と堆積域下端との間の高度差 $H$ と水平距離 $L$ との比( $H/L$ )を用いて、落石・崩壊の運動様式を考察した。両者とも、 $H/L$ が0.6以上で、巨大崩壊や扇状地で生じる土石流などに比べて極めて運動性が低い。しかし、約 $10^0 \text{ m}^3$ 以下の岩屑を運搬する落石では規模の増加とともに $H/L$ が基本的に減少するのに対し、移動物質量 $10^0 \text{ m}^3 \sim 10^3 \text{ m}^3$ 程度の崩壊では規模の増加とともに $H/L$ が徐々に増加する傾向を示す。崩壊において規模— $H/L$ の傾向が落石の場合と逆になるのは、規模が大きくなれば、残雪斜面との衝突時により大きな“えぐれ”を形成して多くの運動量を失い、かつ巻き込む残雪の量が増えることによって内部摩擦が増加し、移動距離が減少するためと考えられる。

一次的岩屑移動プロセスについて、規模ごとに相対垂直移動量を見積もると、移動物質量が $10^1 \sim 10^2 \text{ m}^3$ 程度の崩壊は、相対垂直移動量が $10^6 \text{ t} \cdot \text{m} / \text{km}^2 \cdot \text{year}$ オーダーであり、これより規模が大きい崩壊あるいは小さい落石のどちらの値に比べても1桁大きく、地形形成作用としての強度が相対的に最も強いことがわかった。

涸沢カールでの一次的な移動プロセスによる岩屑量を10年単位で表すと、落石によって崖錐斜面中下部に $10^2 \text{ m}^3$ オーダーの後半、崩壊によって崖錐斜面中部に $10^3 \text{ m}^3$ 程度、大規模崩壊によって崖錐斜面上中部に $10^3 \text{ m}^3$ 程度の岩屑が運搬される。一方、崖錐斜面頂部付近では、落石などによって、粒径の小さい岩屑を中心に、約 $10^3 \text{ m}^3$ をやや上回る量が運搬されるものの、大規模な湿雪混じり土石流などによってほぼ同量の岩屑が除去されている。従って、崖錐斜面頂部付近では収支がほぼ釣り合い、ほぼ同様の湿雪混じり土石流の発生条件が周期的に整えられるとみなせる。

## IX 現在の岩屑生産の定量的考察

穂高岳の岩壁での岩屑生産は、高標高ほど活発であり、標高約2,900m以上の弱線付近の岩壁を中心に行われている。岩壁での削剥量は、ライケノメトリーによって、弱線部では約16mm/year以上、弱線縁辺部では約2~8mm/yearと推定される。岩壁の構造に規制された岩屑生産様式に基づき、崩壊の発生周期を超えたより長い時間スケールで考えると、結果的には弱線部の侵食速度をそのまま岩壁での侵食速度と考えることができる。しかしながら、崖錐斜面への岩屑供給量から見積もった岩壁の削剥量が約1~4mm/yearであることから、弱線部分での不安定さが岩屑生産を導く弱線縁辺部の範囲は岩壁全体の1/4以下の面積であり、岩屑をほとんど生産しない堅固な岩壁が面積的に比較的多いとみなせる。

岩壁での岩屑生産が高標高域ほど活発な要因として、高標高域ほど、岩屑生産に最も関与する凍結融解作用が発現しやすくなることが挙げられる。涸沢カールで標高約2,850mが樹木限界に相当し、それより標高が高い約2,900m以上の裸岩壁では岩屑生産が活発で、それ以下の植被岩壁では岩屑生産が少ない。これは、温度環境を大きく変化させる木本植生の分布の違いが岩壁に働く凍結融解作用の質・量を変化させ、それぞれの岩壁で異なった岩屑生産様式を発現させるためと考えられる。樹木限界の決定要因については、樹木限界構成種の生理・生態を踏まえた議論が必要であるが、岩屑生産に関連する立地の安定性が大きく関与していることが示唆できる。

## X章 結論および今後の研究の発展性

穂高岳涸沢カールで生じる地形形成プロセスの観察・測定を中心とした調査に基づき、日本の高山岩壁

とそれを取り巻く斜面での岩屑生産・移動の様式を考察した。

急速度物質移動の岩屑移動様式では、落下した岩屑が崖錐斜面あるいは残雪斜面と衝突する過程が重要である。特に岩屑の規模を規定する要因として、落石や崩壊（Dirty avalanche）の運動形態に分かれ、それに応じて到達範囲が変化する。これらの移動プロセスによる岩屑移動量を涸沢カール南半分において10年単位で見積もると、以下ようになる。落石によって崖錐斜面中下部に $10^2\text{m}^3$ オーダーの後半、小規模崩壊で中部に $10^3\text{m}^3$ 程度、大規模崩壊で上中部に $10^3\text{m}^3$ 程度の岩屑が運搬される。また、崖錐斜面頂部付近には、落石などによって、粒径が小さい岩屑を中心に、岩壁から約 $10^3\text{m}^3$ の物質が供給される。ここでは、発生間隔10年程度で発生する大規模な湿雪混じり土石流などによってほぼ同量の岩屑が除去されていることから、物質収支がほぼ釣り合っている。

涸沢カールの標高約2,900m以上の岩壁では、弱線付近が岩屑生産域であり、地形形成としては凍結融解作用が卓越する。また、岩壁直下の崖錐斜面も、凍結融解作用に起因して発生した落石・崩壊などによる岩屑の堆積域となる。従って、両地域は、質的に異なるものの、局所的に周氷河的な作用が卓越するサブゾーナルな周氷河地域とみなせる。

## 論文審査の結果の要旨

寒冷で、しかも氷河に覆われない環境下で進行する、いわゆる周氷河地形の形成に関しては、凍結破碎および凍結融解の繰り返しによる活発な岩屑生産とゆっくりした岩屑移動を扱った研究が多い。それとはやや異なるきわめて活発な岩屑生産と急速な岩屑移動が、温帯の高山地域のとくに風背側に広がる、寒冷・多雪で氷河を欠く急斜面では卓越し、下流側河谷での地形形成にも大きく影響していると推測されるが、その実態解明には、接近や活動の困難な場所での長期にわたる観察・観測を要するため、研究例が乏しい。岩船昌起提出の論文は、世界的にみても多雪な山地である穂高岳東面の涸沢カールで、数年にわたる多面的な観察・観測を考案・遂行し、その結果を解析したものである。

まず、3年半にわたる岩盤温度の連続的観測で、凍結期間、凍結融解頻度などを明らかにし、同時に、厳冬期を除く期間の落石発生頻度を調査して、融解進行時、次いで凍結進行時に落石発生が多いことをつきとめた。次いで、岩屑移動の活発な融雪期3シーズンの観察・観測から、岩屑移動が主として落石、Dirty avalanche、および湿雪混じり土石流の3種のプロセスによることを確認し、各プロセスの運動機構、移動岩屑の形態特性、運搬量などを考察した。その間、大規模な岩壁崩壊に遭遇し、その発生位置、移動速度・距離、移動岩屑の形態特性、運搬量、およびその発生頻度などを検討した。さらに、岩屑に覆われた多年性氷体を発見して、その形成機構およびその岩屑移動における意義を論じた。加えて、岩壁面や岩屑表面のライケノメトリーから、岩壁各部分の平均剝離速度を求めた。

これら、すべて自身の観察・観測で得た資料に基づき、各プロセスの発生位置の特性や連鎖的発生なども考慮に入れて検討し、岩壁からの岩屑生産量、各種プロセスで崖錐各部分に運搬される岩屑量等を10年単位で算出した。また、岩屑のサイズや形態と移動距離（したがって堆積位置）との関係も指摘した。求められた岩屑運搬レートは、従来他地域の類似環境で報告されているものより1~2桁大きく、カール壁ーカール底の範囲では岩屑生産・移動の収支がほぼつりあっていることがわかった。

この研究は、従来直接観察・観測資料をほとんど欠いていた日本の高山急斜面での岩屑生産・移動に関する貴重な定量的一次資料を提供し、その多面的解析により、寒冷・多雪・急峻環境での地形プロセスの研究に多くの新知見をもたらしたものとして評価できる。また、気候地形発達史の研究に多くの示唆を与えるものともなる。このように、本論文を完成させた著者は自立して研究活動を進めるに必要な高度の研究能力と学識を有することが明らかなので、岩船昌起提出の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。